

550,514

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
4 novembre 2004 (04.11.2004)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2004/094952 A1

(51) Classification internationale des brevets⁷ :
G01C 19/66, H01S 3/083

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2004/050349

(22) Date de dépôt international : 23 mars 2004 (23.03.2004)

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
03/03645 25 mars 2003 (25.03.2003) FR

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) :
THALES [FR/FR]; Thales, 45, rue de Villiers, F-92200
Neuilly-Sur-Seine (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) :
SCHWARTZ, Sylvain [FR/FR]; Thales Intellectual
Property, 31-33, avenue Aristide Briand, F-94117 Arcueil
Cedex (FR). FEUGNET, Gilles [FR/FR]; Thales Intel-
lectual Property, 31-33, avenue Aristide Briand, F-94117
Arcueil Cedex (FR). POCHOLLE, Jean-Paul [FR/FR];
Thales Intellectual Property, 31-33, avenue Aristide
Briand, F-94117 Arcueil Cedex (FR).

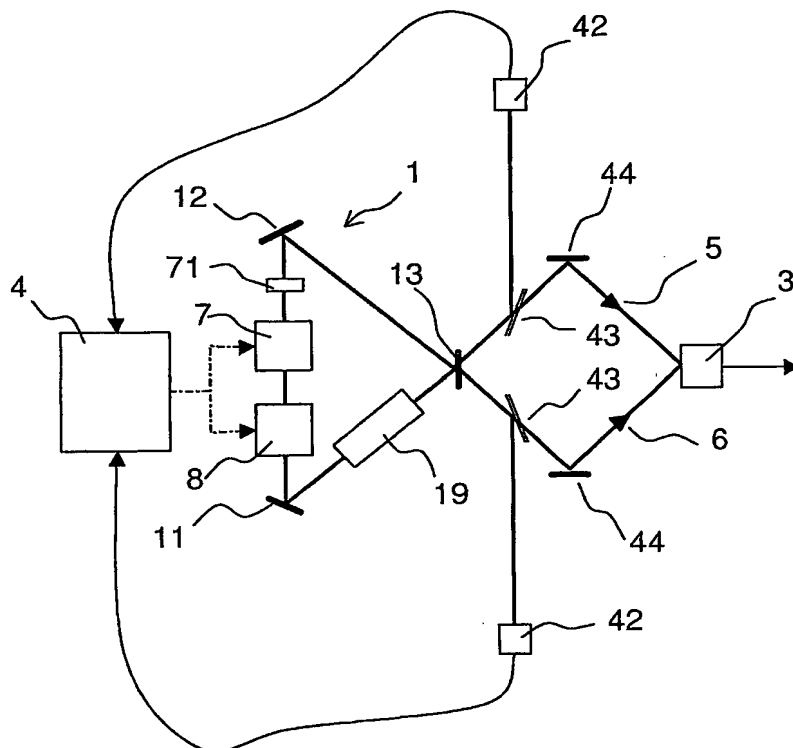
(74) Mandataires : ESSELIN, Sophie etc.; Thales Intellectual
Property, 31-33, avenue Aristide Briand, F-94117 Arcueil
Cedex (FR).

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de
protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AT,
AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO,

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: STABILISED SOLID-STATE LASER GYROSCOPE

(54) Titre : GYROLASER A ETAT SOLIDE STABILISE



(57) Abstract: A major problem with solid-state laser gyroscopes is that the optical cavity is by its nature very unstable. According to the invention, this instability may be reduced by the introduction of controlled optical losses into the cavity (1), dependent on the direction of propagation, by means of providing an optical unit comprising a polarising element (71), a first element with a reciprocal effect (7), acting on the polarisation of the waves and a second element (8), also acting on the polarisation of the wave, whereby at least one of the two effects is variable and said losses are electronically controlled to follow the intensity difference between the counter-propagating effects. Several devices are disclosed using either fixed reciprocal effects and variable non-reciprocal effects or vice versa. Said devices are of application to monolithic cavity lasers and in particular lasers of the Neodymium-YAG type as well as lasers with a fibre cavity.

[Suite sur la page suivante]

WO 2004/094952 A1



CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

- avec rapport de recherche internationale
- avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si des modifications sont reçues

(84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR),

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

(57) Abrégé : Un des problèmes majeurs inhérents aux gyrolasers à état solide est que leur cavité optique est par nature fortement instable. Pour réduire cette instabilité, l'invention propose d'introduire dans la cavité (1) des pertes optiques contrôlées dépendantes du sens de propagation par la mise en place d'un ensemble optique comprenant un élément à effet réciproque (7) agissant sur la polarisation de l'onde et un second élément à effet non réciproque (8) agissant également sur la polarisation de l'onde, au moins l'un de ces deux effets étant variable, et d'asservir électroniquement ces pertes à la différence d'intensité entre les modes contre-propageants. Plusieurs dispositifs sont décrits mettant en oeuvre soit des effets réciproques fixes associés à des effets non réciproques variables, soit l'inverse. Ces dispositifs s'appliquent notamment aux lasers à cavités monolithiques et, en particulier, aux lasers de type Néodyme-YAG ainsi qu'aux lasers à cavités fibrées.

GYROLASER A ETAT SOLIDE STABILISE

Le domaine de l'invention est celui des gyrolasers à état solide utilisés pour la mesure des vitesses de rotation. Ce type d'équipement est notamment utilisé pour les applications aéronautiques.

5

Le gyrolaser, mis au point il y a une trentaine d'années, est largement commercialisé et utilisé de nos jours. Son principe de fonctionnement est fondé sur l'effet Sagnac, qui induit une différence de fréquence $\Delta\nu$ entre les deux modes optiques d'émission se propageant en sens opposé, dits contre-propageants, d'une cavité laser en anneau bidirectionnelle animée d'un mouvement de rotation. Classiquement, la différence de fréquence $\Delta\nu$ est égale à :

10

$$\Delta\nu = 4A\Omega / \lambda L$$

15

où L et A sont respectivement la longueur et l'aire de la cavité ; λ est la longueur d'onde d'émission laser hors effet Sagnac ; Ω est la vitesse de rotation de l'ensemble.

La mesure de $\Delta\nu$ obtenue par analyse spectrale du battement des deux faisceaux émis permet de connaître la valeur de Ω avec une très grande précision.

20

On démontre également que le gyrolaser ne fonctionne correctement qu'au-delà d'une certaine vitesse de rotation nécessaire pour diminuer l'influence du couplage entre modes. La plage de vitesse de rotation située en deçà de cette limite est appelée classiquement zone aveugle.

25

La condition d'observation du battement, et donc de fonctionnement du gyrolaser, est la stabilité et la relative égalité des intensités émises dans les deux directions. Son obtention n'est pas a priori chose aisée en raison du phénomène de compétition entre modes, qui fait que l'un des deux modes contre-propageants peut avoir tendance à monopoliser le gain disponible, au détriment de l'autre mode.

30

Ce problème est résolu dans les gyrolasers usuels par l'utilisation d'un milieu d'amplification gazeux, généralement un mélange d'Hélium-Néon, fonctionnant à température ambiante. La courbe de gain du mélange gazeux présente un élargissement Doppler dû à l'agitation thermique des atomes.

- 5 Les seuls atomes susceptibles de fournir du gain à un mode de fréquence donnée sont ainsi ceux dont la vitesse induit un décalage Doppler de la fréquence de transition qui amène l'atome à résonance avec le mode en question. En forçant l'émission laser à avoir lieu ailleurs qu'au centre de la courbe de gain (par ajustement piézoélectrique de la longueur du chemin
- 10 optique), on s'assure que les atomes à résonance avec la cavité ont une vitesse non nulle. Ainsi, les atomes pouvant contribuer au gain dans l'une des deux directions ont des vitesses opposées à celles des atomes pouvant contribuer au gain dans la direction opposée. Tout se passe donc comme s'il y avait deux milieux amplificateurs indépendants, un pour chaque direction.
- 15 La compétition entre les modes ayant ainsi disparu, on obtient une émission bidirectionnelle stable et équilibrée (en pratique, pour pallier d'autres problèmes, on utilise un mélange de deux isotopes différents du Néon).

- Le caractère gazeux du milieu amplificateur est toutefois une source de complications techniques lors de la réalisation du gyrolaser
- 20 (notamment en raison de la grande pureté de gaz requise) et d'usure prématurée lors de son utilisation (fuite de gaz, détérioration des électrodes, haute tension utilisées pour établir l'inversion de population...).

- Actuellement, il est possible de réaliser un gyrolaser à état solide
- 25 fonctionnant dans le visible ou le proche infra-rouge en utilisant, par exemple, un milieu amplificateur à base de cristaux de YAG (Yttrium-Aluminium-Grenat) dopé au Néodyme à la place du mélange gazeux Hélium-Néon, le pompage optique étant alors assuré par des diodes laser fonctionnant dans le proche infra-rouge. On peut également utiliser comme
- 30 milieu amplificateur un matériau semi-conducteur, une matrice cristalline ou un verre dopé avec des ions appartenant à la classe des terres rares (Erbium, Ytterbium...). On supprime ainsi, de facto, tous les problèmes inhérents à l'état gazeux du milieu amplificateur. Toutefois, une telle réalisation est rendue très difficile par le caractère homogène de
- 35 l'élargissement de la courbe de gain des milieux solides qui induit une très

forte compétition entre modes et l'existence d'un grand nombre de régimes de fonctionnement différents, parmi lesquels le régime bidirectionnel équilibré en intensité (dit "régime de battement") est un cas particulier très instable (N. Kravtsov, E. Lariontsev, Self-modulation oscillations and relaxations
5 processes in solid-state ring lasers, Quantum Electronics 24 (10) 841-856 (1994)). Cet obstacle physique majeur a fortement limité jusqu'à maintenant le développement des gyrolasers à état solide.

Pour pallier cet inconvénient, une solution technique consiste à
10 atténuer les effets de la compétition entre modes contre-propageants dans un laser en anneau à état solide en introduisant dans la cavité des pertes optiques dépendantes du sens de propagation du mode optique et de son intensité. Le principe est de moduler par un dispositif d'asservissement ces pertes en fonction de la différence d'intensité entre les deux modes émis afin
15 de favoriser le mode le plus faible au détriment de l'autre, de façon à constamment asservir l'intensité des deux modes contre-propageants à une valeur commune.

En 1984, il a été proposé de réaliser un dispositif
20 d'asservissement dans lequel les pertes étaient obtenues au moyen d'un ensemble optique composé essentiellement d'un élément à effet Faraday variable et d'un élément polarisant (A.V. Dotsenko, E.G. Lariontsev, Use of a feedback circuit for the improvement of the characteristics of a solid-state ring laser, Soviet Journal of Quantum Electronics 14 (1) 117-118 (1984) —
25 A.V. Dotsenko, L.S. Komienko, N.V. Kravtsov, E.G. Lariontsev, O.E. Nanii, A.N. Shelaev, Use of a feedback loop for the stabilization of a beat regime in a solid-state ring laser, Soviet Journal of Quantum Electronics 16 (1) 58-63 (1986)).

Le principe de ce dispositif d'asservissement est illustré en figure
30 1. Il consiste à introduire dans une cavité 1 en anneau, constituée de 3 miroirs 11, 12 et 13 et d'un milieu amplificateur 19, un ensemble optique disposé sur le trajet des modes optiques contre-propageants 5 et 6, ledit ensemble étant constitué d'un élément polarisant 71 et d'un barreau optique 72 à effet Faraday entouré d'une bobine d'induction 73. A la sortie de la
35 cavité, les deux modes optiques 5 et 6 sont envoyés sur une photodiode de

mesure 3. Une partie de ces faisceaux 5 et 6 est prélevée au moyen des deux lames semi-réfléchissantes 43 et envoyée sur les deux photodétecteurs 42. Les signaux issus de ces deux photodétecteurs sont représentatifs de l'intensité lumineuse des deux modes optiques contre-propageants 5 et 6.

5 Lesdits signaux sont envoyés à un module électronique d'asservissement 4, qui génère une intensité électrique proportionnelle à la différence d'intensité lumineuse entre les deux modes optiques. Cette intensité électrique détermine la valeur des pertes infligées à chacun des modes contre-propageants 5 et 6. Si un des faisceaux a une intensité lumineuse supérieure

10 à l'autre, son intensité sera plus atténuée, de façon à ramener les faisceaux de sortie au même niveau d'intensité. On stabilise ainsi le régime bidirectionnel en intensité.

Un gyrolaser à état solide ne peut fonctionner, selon ce principe,

15 que si les paramètres du dispositif d'asservissement sont adaptés à la dynamique du système. Pour que le dispositif d'asservissement puisse donner des résultats corrects, trois conditions doivent être remplies :

- Les pertes supplémentaires introduites dans la cavité par le dispositif d'asservissement doivent être du même ordre de
- 20 grandeur que les pertes propres de la cavité.
- La vitesse de réaction du dispositif d'asservissement doit être supérieure à la vitesse de variation des intensités des modes émis de façon que l'asservissement fonctionne de façon satisfaisante.
- 25 • Enfin, la force de rétroaction du dispositif d'asservissement doit être suffisante pour que l'effet induit dans la cavité compense efficacement les variations d'intensité.

Les équations dites de Maxwell-Bloch permettent de connaître les

30 amplitudes complexes $E_{1,2}$ des champs des modes optiques contre-propageants, ainsi que la densité N d'inversion de population. Elles sont obtenues en utilisant un modèle semi-classique (N. Kravtsov, E. Lariotsev, Self-modulation oscillations and relaxations processes in solid-state ring lasers, Quantum Electronics 24(10) 841-856 (1994)).

35 Ce sont :

5

5

$$\text{Equation 1 : } dE_{1,2}/dt = - (\omega/2Q_{1,2})E_{1,2} + i(m_{1,2}/2) E_{2,1} \pm i(\Delta\nu/2) E_{1,2} + (\sigma/2T)(E_{1,2})^2 N dx + E_{2,1} \int N e^{\pm 2ikx} dx$$

$$\text{Equation 2 : } dN/dt = W - (N/T_1) - (a/T_1)N |E_1 e^{-ikx} + E_2 e^{ikx}|^2$$

où

- 5 les indices 1 et 2 sont représentatifs des deux modes optiques contre-propageants ;
 ω est la fréquence d'émission laser hors effet Sagnac ;
 $Q_{1,2}$ sont les facteurs de qualité de la cavité dans les deux sens de propagation ;
 10 $m_{1,2}$ sont les coefficients de rétrodiffusion de la cavité dans les deux sens de propagation ;
 σ est la section efficace d'émission laser ;
 l est la longueur de milieu à gain traversée ;
 $T = L/c$ est le temps de parcours de chaque mode de la cavité ;
 15 $k = 2\pi/\lambda$ est la norme du vecteur d'onde ;
 W est le taux de pompage ;
 T_1 est la durée de vie du niveau excité ;
 a , paramètre de saturation, est égal à $\sigma T_1 / 8\pi \omega$.

20 Le second membre de l'équation 1 comprend quatre termes. Le premier terme correspond à la variation du champ due aux pertes de la cavité, le second terme correspond à la variation du champ induit par la rétrodiffusion d'un mode sur l'autre mode en présence d'éléments diffusants présents à l'intérieur de la cavité, le troisième terme correspond à la variation
 25 du champ due à l'effet Sagnac et le quatrième terme correspond à la variation du champ due à la présence du milieu amplificateur. Ce quatrième terme a deux composantes, la première correspond à l'émission stimulée, la seconde à la rétrodiffusion d'un mode sur l'autre mode en présence d'un réseau d'inversion de population au sein du milieu amplificateur.

30 Le second membre de l'équation 2 comprend trois termes, le premier terme correspond à la variation de la densité d'inversion de population due au pompage optique, le second terme correspond à la variation de la densité d'inversion de population due à l'émission stimulée et le troisième terme correspond à la variation de la densité d'inversion de
 35 population due à l'émission spontanée.

Les pertes moyennes P_C dues à la cavité après une rotation complète du mode optique valent par conséquent :

$P_C = \omega T/2 Q_{1,2}$ selon le premier terme du second membre de l'équation 1.

Les pertes introduites par les dispositifs d'asservissement P_A doivent être du même ordre de grandeur que ces pertes moyennes P_C . Ces pertes sont généralement de l'ordre du pour cent.

La vitesse de réaction du dispositif d'asservissement peut être caractérisée par la bande passante γ dudit dispositif d'asservissement. On démontre, en utilisant les équations 1 et 2 (A.V. Dotsenko, E.G. Lariontsev, Use of a feedback circuit for the improvement of the characteristics of a solid-state ring laser, Soviet Journal of Quantum Electronics 14 (1) 117-118 (1984) — A.V. Dotsenko, L.S. Komienko, N.V. Kravtsov, E.G. Lariontsev, O.E. Nani, A.N. Shelaev, Use of a feedback loop for the stabilization of a beat regime in a solid-state ring laser, Soviet Journal of Quantum Electronics 16 (1) 58-63 (1986)), qu'une condition suffisante d'établissement du régime bidirectionnel stable au-delà de la vitesse de rotation peut s'écrire :

$$\gamma \gg \eta \omega / [Q_{1,2} (\Delta \nu T_1)^2]$$

avec $\eta = (W - W_{\text{seuil}}) / W$.

η correspond au taux relatif de pompage au-dessus du seuil W_{seuil} . A titre d'exemple, pour un taux relatif de pompage η de 10%, une fréquence optique ω de $18 \cdot 10^{14}$, un facteur de qualité $Q_{1,2}$ de 10^7 , une différence de fréquence $\Delta \nu$ de 15 kHz et une durée de vie du niveau excité T_1 de 0,2 ms, la bande passante γ doit être supérieure à 40 kHz.

Pour que la boucle fonctionne correctement, la relation suivante doit également être vérifiée : $(\Delta \nu T_1)^2 \gg 1$.

Classiquement, la force de rétroaction du dispositif d'asservissement q est définie de la façon suivante :

$$q = [(Q_1 - Q_2) / (Q_1 + Q_2)] / [(I_2 - I_1) / (I_2 + I_1)]$$

avec I_1 , I_2 intensités lumineuses des deux modes contre-propagants.

Dans ce type d'application, on démontre que le paramètre q doit être supérieur à $1/(\Delta\nu T_1)^2$ pour que le dispositif d'asservissement puisse fonctionner correctement.

5 L'objet de notre invention est de proposer un dispositif stabilisateur pour gyrolaser à état solide, qui est constitué d'un système d'asservissement infligeant des pertes optiques dépendant du sens de propagation en se fondant sur la combinaison de trois effets physiques : la rotation réciproque, la rotation non réciproque et la polarisation. Le dispositif
10 stabilisateur selon l'invention permet d'obtenir les conditions nécessaires au bon fonctionnement du gyrolaser.

Il y a effet optique non réciproque dans un composant optique lorsque, la lumière ayant un état de polarisation initial, l'état de polarisation
15 de la lumière est différent de cet état initial après un aller-retour dans ledit composant. Les matériaux à effet Faraday sont des matériaux qui, lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique, font tourner la direction de polarisation d'un faisceau polarisé linéairement qui les traverse. Cet effet n'est pas réciproque. Ainsi, le même faisceau venant en sens inverse subira une
20 rotation de sa direction de polarisation dans le même sens. Ce principe est illustré en figure 2a. La direction de polarisation 51 du faisceau 5 polarisé linéairement subit une rotation d'un angle β lorsqu'elle traverse le composant à effet Faraday 8 dans le sens direct (schéma supérieur de la figure 2a). Si l'on réinjecte dans le composant à effet Faraday un faisceau identique 6 se
25 propageant dans le sens opposé et dont la direction de polarisation est initialement tournée de β , sa direction de polarisation 51 tourne à nouveau de l'angle β en traversant le composant, l'angle de rotation total faisant alors 2β après un aller-retour (schéma central de la figure 2a). Dans un composant classique à effet réciproque 7, la direction de polarisation 51 aurait tourné de
30 $-\beta$, de façon à retrouver sa position initiale (schéma inférieur de la figure 2a).

Plus précisément, l'invention a pour objet un gyrolaser comportant au moins une cavité optique en anneau comprenant au moins trois miroirs,
35 un milieu amplificateur à l'état solide et un système d'asservissement, la

cavité et le milieu amplificateur étant tels que deux modes optiques dits contre-propageants peuvent se propager en sens inverse l'un de l'autre à l'intérieur de ladite cavité optique, le système d'asservissement permettant de maintenir la quasi-égalité d'intensité des deux modes contre-propageants, le système d'asservissement comportant au moins, à l'intérieur de la cavité, un ensemble optique comprenant un élément polarisant, un dispositif à effet non réciproque agissant sur l'état de polarisation des modes contre-propageants, caractérisé en ce que ledit ensemble optique comporte également un dispositif à effet réciproque agissant également sur l'état de polarisation des modes contre-propageants, le système d'asservissement comportant des moyens de réglage permettant de régler au moins l'un des effets desdits dispositifs à effet réciproque et non réciproque.

Deux grands choix techniques sont alors possibles :

- Soit l'effet réciproque est fixe, dans ce cas, l'effet non réciproque doit être réglable pour que le dispositif d'asservissement puisse fonctionner.
- Soit l'effet non réciproque est fixe, dans ce cas, l'effet réciproque doit être réglable pour que le dispositif d'asservissement puisse fonctionner.

L'invention sera mieux comprise et d'autres avantages apparaîtront à la lecture de la description qui va suivre donnée à titre non limitatif et grâce aux figures annexées parmi lesquelles :

- La figure 1 représente le principe de fonctionnement du dispositif d'asservissement selon l'art antérieur.
- La figure 2a représente le principe de l'effet Faraday, non réciproque.
- La figure 2b représente le principe général du dispositif permettant d'induire des pertes dépendantes du sens de propagation selon l'invention.
- La figure 3 représente le schéma général du dispositif d'asservissement selon l'invention.
- La figure 4 représente le principe général de l'effet réciproque introduit par une cavité non planaire.

- La figure 5 représente la vue générale d'une cavité monolithique.
- La figure 6 représente la vue générale d'un gyrolaser comprenant une cavité monolithique.
- 5 • La figure 7 représente le schéma de principe d'une cavité non planaire et monolithique.
- Les figures 8a et 8b représentent les schémas de principe de la création d'un champ magnétique variable dans une cavité monolithique à effet Faraday.
- 10 • La figure 9 représente le schéma de principe de la création d'un champ magnétique fixe dans une cavité monolithique à effet Faraday.
- La figure 10 représente le schéma de principe d'une cavité gyrolaser réalisée à base de fibres optiques.

15

Le principe de la combinaison d'un effet optique réciproque et d'un effet optique non réciproque est illustré sur l'exemple de la figure 2b dans le cas où les effets réciproques et non réciproques sont simplement des rotations de la polarisation linéaire. Les deux schémas de cette figure

20 représentent une partie d'une cavité en anneau dans laquelle peuvent circuler deux faisceaux optiques contre-propageants 5 et 6. Cette cavité comporte, entre autres, un ensemble optique constitué d'un polariseur linéaire 71, d'un premier élément à effet réciproque 7 agissant sur la direction de polarisation de la lumière polarisée linéairement et d'un second élément à

25 effet non réciproque 8 agissant également sur la direction de la polarisation de la lumière. Pour des raisons de clarté, la partie de la cavité comprenant cet ensemble optique a été représentée en ligne. L'indication de direction de polarisation des faisceaux optiques a été représentée par une flèche. Le

30 premier élément 7 fait tourner la polarisation de la lumière d'un angle α dans le sens direct et le second élément 8 fait tourner la polarisation d'un angle β également dans le sens direct. L'élément 7 peut notamment être une lame demi-onde dont l'axe est tourné d'un angle de $\alpha/2$ par rapport à l'axe de polarisation du polariseur linéaire 71. L'élément 8 peut être un rotateur de Faraday comme précédemment cité. Soit un premier faisceau optique 5

35 polarisé linéairement par le polariseur linéaire 71 et traversant

successivement le premier et le second élément comme illustré sur le schéma du haut de la figure 2b, après la traversée du premier élément, sa direction de polarisation a tourné d'un angle α et, après la traversée du second élément, sa direction de polarisation a tourné d'un angle θ_{direct} égal à $\alpha + \beta$. Lorsque ce faisceau passe de nouveau, après un tour complet, à travers le polariseur linéaire 71, sa transmission T_{direct} relative sera de :

$$T_{\text{direct}} = \cos^2(\alpha + \beta).$$

Soit encore, dans le cas où les angles de rotation ont des valeurs faibles, une perte P_{direct} relative d'intensité de :

$$P_{\text{direct}} = (\alpha + \beta)^2 \text{ obtenue en faisant un développement limité au second ordre de la fonction cosinus.}$$

Soit un second faisceau optique 6 polarisé linéairement et traversant successivement en sens opposé par rapport au premier faisceau 5 le second puis le premier élément comme illustré sur le schéma du bas de la figure 2b, après la traversée du second élément, sa direction de polarisation a tourné d'un angle β et, après la traversée du premier élément, sa direction de polarisation a tourné d'un angle θ_{inverse} égal à $-\alpha + \beta$. Lorsque ce faisceau passe à travers un polariseur linéaire dont l'axe est orienté parallèlement à la direction de polarisation initiale du faisceau, sa transmission T_{inverse} relative sera de :

$$T_{\text{inverse}} = \cos^2(\beta - \alpha).$$

Soit encore, dans le cas où les angles de rotation ont des valeurs faibles, une perte P_{inverse} relative d'intensité de :

$$P_{\text{inverse}} = (\beta - \alpha)^2 \text{ obtenue en faisant un développement limité au second ordre de la fonction cosinus.}$$

Par conséquent, les pertes dans le sens inverse de propagation sont différentes de celles enregistrées dans le sens direct, ce qui correspond bien au résultat recherché. Il est ainsi possible de faire varier de façon différente les intensités des modes contre-propageants en faisant varier un des deux angles de rotation α ou β .

Bien entendu, l'exemple précédent peut être généralisé à toute combinaison d'effet réciproque et d'effet non réciproque agissant sur l'état de polarisation de la lumière telle que ladite combinaison puisse être transformée en variation d'intensité lumineuse par un élément polarisant.

Dans une cavité réelle, différents types de composants (miroirs de la cavité, milieu amplificateur, polariseurs...) peuvent influencer l'état de polarisation des faisceaux optiques ainsi que leur intensité. Pour connaître exactement l'état de polarisation des faisceaux contre-propageants après un tour complet
 5 de la cavité, on utilise le formalisme des matrices de Jones. Celui-ci consiste à représenter l'influence d'un composant sur l'état de polarisation par une matrice 2x2 référencée dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation des faisceaux. En général, les axes du repère choisi correspondent aux axes principaux d'un polariseur intra-cavité, ce qui facilite
 10 la représentation mathématique. Pour connaître l'influence résultante de l'ensemble des composants intra-cavité, il suffit alors de déterminer les états propres du produit des différentes matrices représentatives de ces composants. Ce produit n'étant pas forcément commutatif, l'influence pourra être différente selon le sens de propagation des faisceaux.

15 Dans l'exemple illustré en figure 2b, la matrice de Jones M_{directe} d'une cavité comportant le polariseur 71, l'élément à effet réciproque 7 et l'élément à effet non réciproque 8 s'écrit dans le sens direct :

20
$$M_{\text{directe}} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha + \beta) & 0 \\ \sin(\alpha + \beta) & 0 \end{bmatrix}$$

La polarisation résultante après un tour complet est une polarisation
 25 linéaire inclinée d'un angle $\alpha + \beta$ par rapport à l'axe de polarisation du polariseur et la transmission en intensité à travers le polariseur vaut $\cos(\alpha + \beta)^2$.

La matrice de Jones $M_{\text{indirecte}}$ de la même cavité comportant le polariseur 71, l'élément à effet réciproque 7 et l'élément à effet non réciproque 8 s'écrit
 30 dans le sens indirect :

35
$$M_{\text{indirecte}} = \begin{bmatrix} \cos(-\alpha + \beta) & -\sin(-\alpha + \beta) \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

La polarisation résultante après un tour complet est une polarisation linéaire inclinée d'un angle $-\alpha+\beta$ par rapport à l'axe de polarisation du polariseur et la transmission à travers le polariseur en intensité vaut $\cos(-\alpha+\beta)^2$.

5

La figure 3 représente le schéma d'ensemble d'un gyrolaser selon l'invention. Il comprend une cavité 1 en anneau constituée d'au moins 3 miroirs 11, 12 et 13, d'un milieu amplificateur 19 à l'état solide et d'un ensemble optique disposé sur le trajet des modes optiques contre-propageants 5 et 6, ledit ensemble étant constitué d'un élément polarisant 71, d'un dispositif 7 à effet réciproque agissant sur l'état de polarisation des modes contre-propageants et un dispositif 8 à effet non réciproque agissant également sur l'état de polarisation des modes contre-propageants, au moins l'un des effets desdits dispositifs étant réglable. A la sortie de la cavité, les deux modes optiques 5 et 6 sont envoyés sur une photodiode de mesure 3. Une partie de ces faisceaux 5 et 6 est prélevée au moyen des deux lames semi-réfléchissantes 43 et envoyée sur les deux photodétecteurs 42. Les signaux issus de ces deux photodétecteurs sont représentatifs de l'intensité lumineuse des deux modes optiques contre-propageants 5 et 6. Lesdits signaux sont envoyés à un module électronique d'asservissement 4 qui pilote, en fonction de l'intensité des signaux reçus, le dispositif à effet variable (flèches en pointillés sur le schéma). Cela va se traduire par des variations des états de polarisation des deux faisceaux contre-propageants. Ces variations d'état de polarisation entraînent ainsi des pertes optiques différentes sur les modes optiques contre-propageants 5 et 6 chaque fois qu'après avoir effectué une rotation complète les modes traversent de nouveau l'élément polarisant 71. Ces pertes sont fonction de l'intensité des faisceaux de sortie. Si l'un des faisceaux a une intensité lumineuse supérieure à l'autre, son intensité sera plus atténuée, de façon à ramener les faisceaux de sortie au même niveau d'intensité. On stabilise ainsi le régime bidirectionnel en intensité.

Il existe différents types d'éléments polarisants 71. L'élément polarisant peut être notamment un polariseur linéaire. Il peut être également obtenu par traitement sur un des miroirs de la cavité. Il est également

35

possible d'utiliser les propriétés de la réflexion sur l'interface entre deux milieux d'indices différents, par exemple en plaçant dans la cavité une lame de verre inclinée à l'angle de Brewster par rapport à la direction de propagation des modes 5 et 6 ou en taillant à l'incidence de Brewster une
5 face de l'un des éléments présents dans la cavité (notamment le milieu amplificateur ou le dispositif à effet non réciproque).

Il existe différentes méthodes pour réaliser des dispositifs optiques à effet réciproque fixe.

10 On peut notamment utiliser, comme il est décrit sur les figures 4a et 4b, une cavité non planaire. Soit une cavité 1 comportant au moins quatre miroirs 11, 12, 13 et 14, il est possible de les disposer, comme indiqué sur la figure 4a, de telle sorte que les faisceaux contre-propageants se propagent dans un plan (plan (X,Y) de la figure 4a). Dans ce cas, la cavité n'induit pas
15 de rotation réciproque sur les modes qui s'y propagent. Il est également possible de les disposer de telle sorte que les faisceaux contre-propageants ne se propagent plus dans un plan, comme il est indiqué, par exemple, sur la figure 4b, où le miroir 12 a été déplacé sur l'axe des Z. Dans ce cas, on démontre que la direction de polarisation des faisceaux contre-propageants a
20 tourné d'un angle dépendant de la géométrie de la cavité lorsque le faisceau a fait un tour complet de la cavité (A.C. Nilsson, E.K.Gustafson and R.L.Byer – Eigenpolarization Theory of Monolithic Nonplanar Ring Oscillators – IEEE Journal of Quantum Electronics 25 (4) 767-790 (1989)). En d'autres termes, une cavité non planaire peut induire un effet de rotation réciproque sur les
25 modes qui s'y propagent, cet effet étant fixe et dépendant de la géométrie de la cavité.

Il est également possible de réaliser un dispositif à effet réciproque fixe en ajoutant dans la cavité un polariseur linéaire dont la
30 direction de polarisation n'est pas parallèle à celle de l'élément polarisant initial. Dans ce cas, l'angle de rotation réciproque α est égal à l'angle formé par les deux axes des éléments polarisants.

Enfin, il est possible d'obtenir l'effet réciproque fixe en ajoutant
35 dans la cavité une lame optique biréfringente. Si cette lame est une lame

demi-onde, l'angle de rotation α est alors le double de l'angle formé par l'axe de la lame demi-onde avec celui de l'élément polarisant. Bien entendu, cette lame demi-onde peut être rendue solidaire d'un des miroirs de la cavité, de façon à simplifier la réalisation du dispositif.

5

Pour réaliser un dispositif à effet réciproque variable, une solution possible consiste à utiliser un dispositif à biréfringence contrôlable. Pour induire une biréfringence contrôlable, on peut utiliser :

- des céramiques au Plomb, Lantane, Zircinium et Titane ($\text{Pb}_{1-x}\text{La}_x\text{Zr}_{1-y}\text{Ti}_y\text{O}_3$), dont on peut contrôler à la fois l'orientation des axes neutres et la biréfringence dans une zone en l'entourant d'électrodes et en appliquant un champ électrique de quelques centaines de volts. Ces céramiques ont des épaisseurs de moins d'un millimètre, sont transmissives dans le proche infrarouge, ont des tensions de commandes de quelques centaines de volts et un temps de réponse de l'ordre de la microseconde compatible avec la bande passante nécessaire évaluée de quelques dizaines de kHz ;
 - des valves à cristaux liquide d'un millimètre d'épaisseur environ (dont la zone active a une épaisseur d'environ 20 microns) ayant des tensions de commande d'une centaine de volts ;
 - des cellules de Pockels, dont on modifie le déphasage en changeant la tension appliquée (typiquement 1kV pour que le déphasage obtenu soit égal à $\pi/2$). Ces cellules, constituées de KDP ou de Niobate de Lithium, par exemple, sont identiques à celles utilisées pour déclencher un laser. Elles ont des épaisseurs de un à deux centimètres et des pertes d'insertions nulles.

Pour réaliser un dispositif à effet non réciproque, on utilise généralement des dispositifs magnéto-optiques, par exemple à effet Faraday, qui nécessitent pour fonctionner la génération d'un champ magnétique. Ces éléments à effet Faraday peuvent être notamment réalisés directement sur les miroirs de la cavité au moyen de couches de matériau magnéto-optiques. Si l'on souhaite obtenir un effet non réciproque fixe, il suffit de réaliser un champ magnétique permanent au moyen de circuits magnétiques à base d'aimants. Si l'on souhaite obtenir un effet non

réciroque variable, il suffit alors de créer un champ magnétique variable, par exemple, au moyen d'une bobine d'induction entourant le matériau à effet Faraday.

Lorsque le milieu s'y prête, il est avantageux d'utiliser le milieu
5 amplificateur comme milieu à effet Faraday. On simplifie de façon importante la réalisation de la cavité. Ainsi, le Néodyme-YAG, qui est utilisé comme milieu amplificateur pour les lasers fonctionnant dans le proche infrarouge, est susceptible de générer suffisamment d'effet Faraday pour être utilisé en tant que tel. En effet, sa constante de Vernet vaut environ $103^{\circ}\text{T}^{-1}\text{m}^{-1}$, ce qui
10 est suffisant pour induire des rotations Faraday de l'ordre du degré pour une épaisseur traversée ne dépassant pas quelques centimètres en présence d'un champ magnétique inférieur au Tesla.

Avantageusement, un laser à état solide selon l'invention est
15 réalisé à partir d'une cavité monolithique comme indiqué sur la figure 5. Cette configuration présente plusieurs avantages.

La cavité peut alors être réalisée directement dans le matériau servant de milieu amplificateur. Les faces de la cavité peuvent être utilisées comme miroirs de la cavité ou comme faces de supports des miroirs de la
20 cavité, ce qui facilite les opérations de réalisation et assure une plus grande stabilité géométrique et une meilleure tenue aux environnements thermiques et vibratoires. La figure 6 montre un schéma de réalisation d'un gyrolaser selon l'invention utilisant une cavité de ce type. Les miroirs 11, 12 et 13 sont directement déposés sur les faces de la cavité monolithique. Le matériau 19
25 de la cavité sert également de milieu amplificateur. Ce matériau est notamment à base de Néodyme-YAG (Yttrium – Aluminium – Grenat). Dans ce cas, le pompage optique est réalisé au moyen d'une diode laser 2 dont le faisceau 22 est focalisé à l'intérieur du milieu amplificateur au moyen d'une lentille 21.

30

La cavité monolithique peut également ne pas être plane
comme indiqué sur la figure 7. On obtient ainsi directement l'effet réciroque par la forme même de la cavité. Dans cet exemple, la cavité est une lame épaisse comportant deux faces planes et parallèles 195 et 196 entre elles et
35 quatre faces latérales inclinées 191, 192, 193 et 194. La forme générale de

la lame est celle d'un coin tronqué. L'inclinaison des faces latérales est choisie de sorte que les faisceaux lumineux parcourent la cavité suivant un losange brisé comme indiqué sur la figure 7.

Un des autres avantages de la cavité monolithique est d'utiliser le milieu amplificateur 19 comme milieu à effet Faraday. Dans ce cas, l'obtention d'un champ magnétique variable est réalisée en entourant la cavité monolithique d'une bobine d'induction 73 comme illustré en figure 8a. Il est également possible, afin d'améliorer l'efficacité de l'effet Faraday, de n'entourer qu'une partie de la cavité avec une ou plusieurs bobines d'induction comme illustré en figure 8b, de manière à ce que le champ magnétique soit toujours parallèle à la direction de propagation. Dans ce cas, la cavité doit être percée pour laisser passer les fils électriques constituant les bobines d'induction.

Un champ magnétique fixe peut être obtenu en disposant sur la cavité monolithique des aimants permanents 74 comme illustré en figure 9.

Il est également possible de réaliser un gyrolaser selon l'invention à partir d'une cavité en fibres optiques. La figure 10 illustre ce principe. La cavité comprend essentiellement une fibre optique 100 en anneau, la fibre optique pouvant être en partie dopée pour agir comme milieu amplificateur. Toutes les géométries de fibres sont envisageables : à simple cœur, à double cœur (pour faciliter le couplage du faisceau de pompage optique), à maintien de polarisation. Des coupleurs Y 101 permettent d'extraire les deux faisceaux contre-propageants 5 et 6. Un troisième coupleur 101 permet d'injecter le faisceau optique de pompe 102 dans la fibre optique. Plusieurs techniques, notamment développées pour les télécommunications optiques, permettent d'effectuer ce couplage (technique dite en Vgroove, par exemple). Le pompage optique est réalisé, par exemple, par une diode laser de pompe, non représentée sur la figure 10.

L'effet optique réciproque peut être obtenu facilement, par exemple en appliquant à la fibre des déformations mécaniques locales, symbolisées par le rectangle 7. Les effets non réciproques peuvent également être obtenus par effet Faraday, symbolisés par le rectangle 8. Grâce au développement des technologies de télécommunication, il existe des isolateurs de Faraday tout fibrés, à entrée et sortie possédant un

connecteur à fibre optique. Ces isolateurs comprennent des éléments non réciproques qui font tourner la direction de polarisation de la lumière polarisée linéairement de 45°. Ces isolateurs peuvent être modifiés pour introduire une rotation non réciproque différente en modifiant soit leurs

5 caractéristiques géométriques soit les champs magnétiques qui leur sont appliqués.

REVENDICATIONS

1. Gyrolaser comportant au moins une cavité optique (1) en anneau comprenant au moins trois miroirs (11, 12, 13), un milieu
5 amplificateur (19) à l'état solide et un système d'asservissement (4, 42, 43), la cavité (1) et le milieu amplificateur (19) étant tels que deux modes optiques (5, 6) dits contre-propageants peuvent se propager en sens inverse l'un de l'autre à l'intérieur de ladite cavité optique, le système d'asservissement permettant de maintenir la quasi-égalité d'intensité des
10 deux modes contre-propageants, le système d'asservissement comportant au moins, à l'intérieur de la cavité, un ensemble optique comprenant un élément polarisant (71), un dispositif à effet non réciproque (8) agissant sur l'état de polarisation des modes contre-propageants, caractérisé en ce que ledit ensemble optique comporte également un dispositif à effet réciproque
15 (7) agissant également sur l'état de polarisation des modes contre-propageants, le système d'asservissement comportant des moyens de réglage permettant de régler au moins l'un des effets desdits dispositifs (7) ou (8).
- 20 2. Gyrolaser selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'élément polarisant (71) est un polariseur linéaire.
3. Gyrolaser selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'élément polarisant (71) est au moins un des miroirs (11, 12, 13) de la cavité.
25
4. Gyrolaser selon la revendication 1, caractérisé en ce que l'élément polarisant (71) est au moins soit une lame de verre inclinée, l'angle d'inclinaison sur les modes optiques (5, 6) étant alors environ égal à l'angle de Brewster, soit l'une des faces d'un élément de la cavité (7, 8 ou 19) taillée
30 à l'incidence de Brewster.

5. Gyrolaser selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que, lorsque le dispositif à effet réciproque (7) est un second polariseur linéaire dont la direction de polarisation n'est pas parallèle à celle du premier
5 polariseur, le système d'asservissement comporte des moyens permettant de régler l'effet non réciproque du dispositif à effet non réciproque (8).

6. Gyrolaser selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que, lorsque le dispositif à effet réciproque (7) est une lame optique
10 biréfringente, le système d'asservissement comporte des moyens permettant de régler l'effet non réciproque du dispositif à effet non réciproque (8).

7. Gyrolaser selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que, lorsque la cavité optique est non plane, le système
15 d'asservissement comporte des moyens permettant de régler l'effet non réciproque du dispositif à effet non réciproque (8).

8. Gyrolaser selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que le dispositif à effet réciproque (7) est une lame optique à biréfringence
20 électriquement contrôlée.

9. Gyrolaser selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que, lorsque le dispositif à effet non réciproque (8) comprend un matériau à effet Faraday polarisé par un aimant permanent, le système
25 d'asservissement comporte des moyens permettant de régler l'effet réciproque du dispositif à effet réciproque (7).

10. Gyrolaser selon l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que le dispositif à effet non réciproque (8) comprend un matériau à effet
30 Faraday polarisé par une bobine d'induction (73) commandée par une intensité électrique réglable.

11. Gyrolaser selon les revendications 9 ou 10, caractérisé en ce que le milieu amplificateur et le matériau à effet Faraday sont réalisés dans
35 le même matériau.

12. Gyrolaser selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la cavité (1) est monolithique, les modes optiques (5, 6) dits contre-propageants se propageant, à l'intérieur de la cavité, 5 uniquement dans un matériau solide.

13. Gyrolaser selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le milieu amplificateur (19) est à base de Néodyme-YAG (Yttrium – Aluminium – Grenat).

10

14. Gyrolaser selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que le pompage optique de la cavité (1) est assuré par au moins une diode laser (2).

15

15. Gyrolaser selon l'une des revendications 1 à 11, caractérisé en ce que la cavité comprend au moins une fibre optique (100) en anneau comportant des coupleurs optiques (101) permettant l'entrée et la sortie des faisceaux contre-propageants et d'au moins un faisceau optique de pompage optique (102).

20

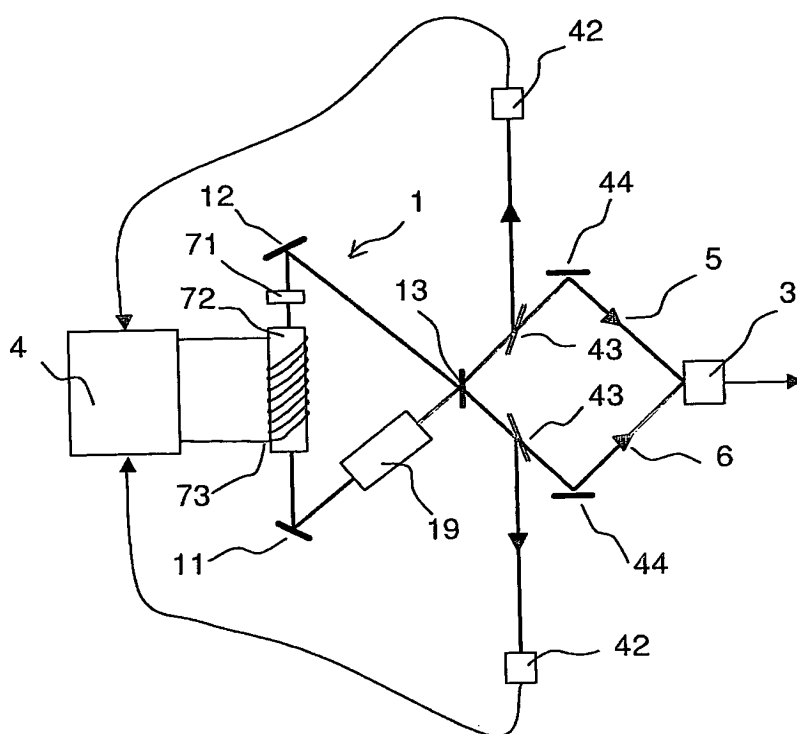


FIG.1

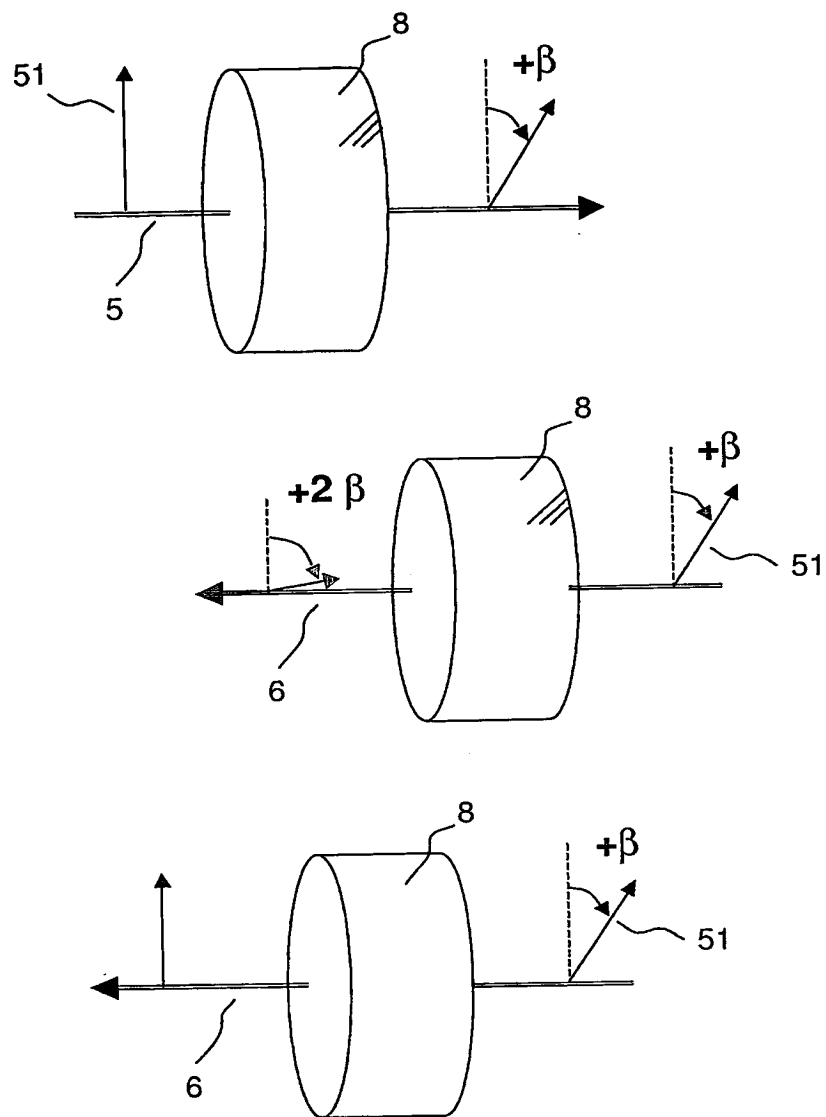


FIG.2a

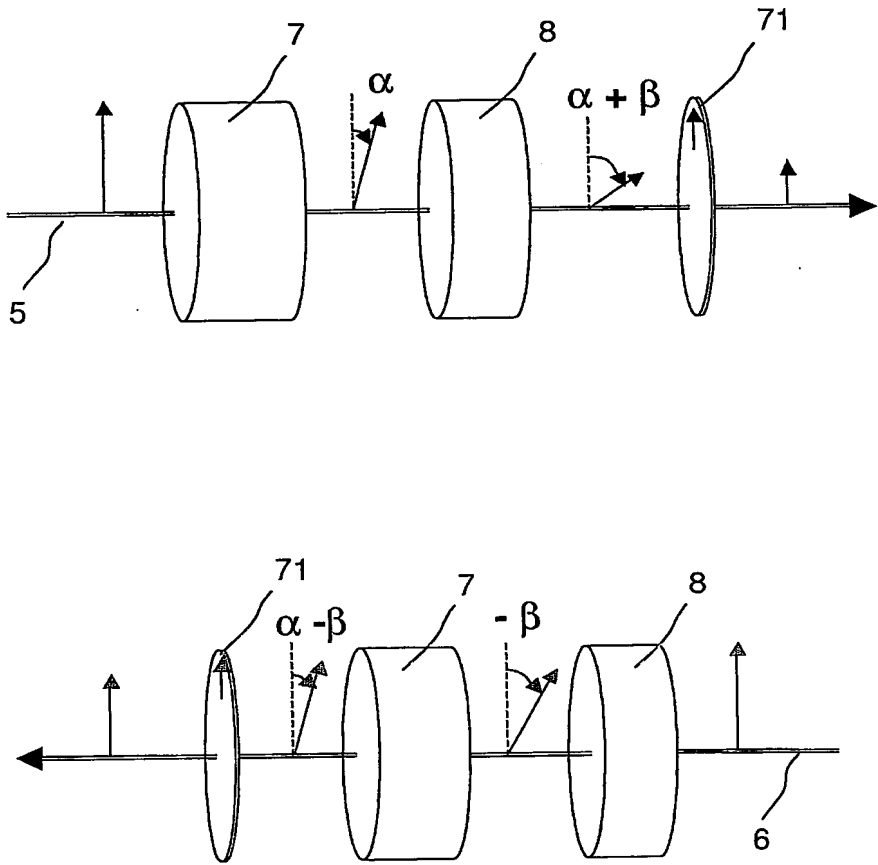


FIG.2b

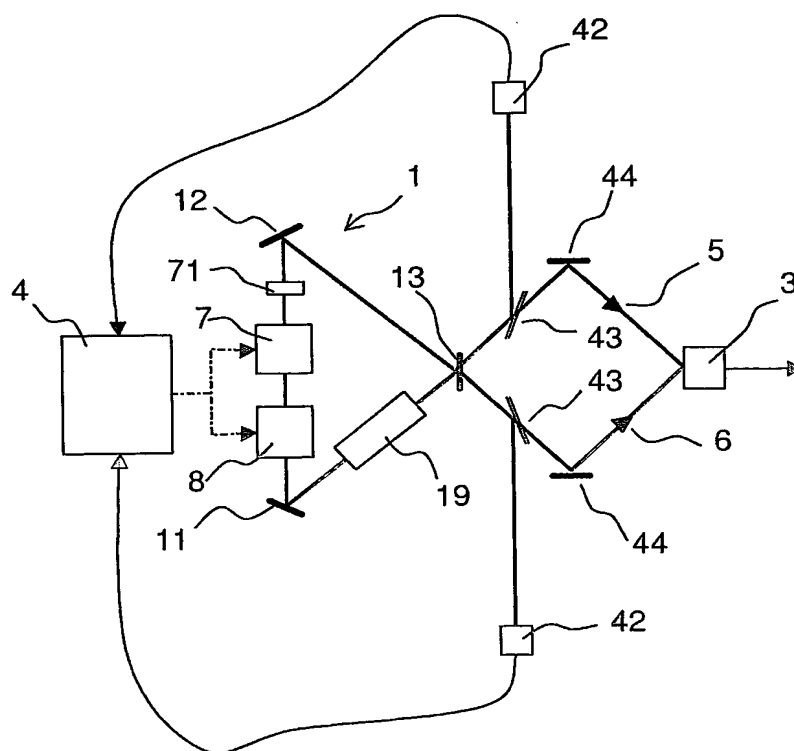
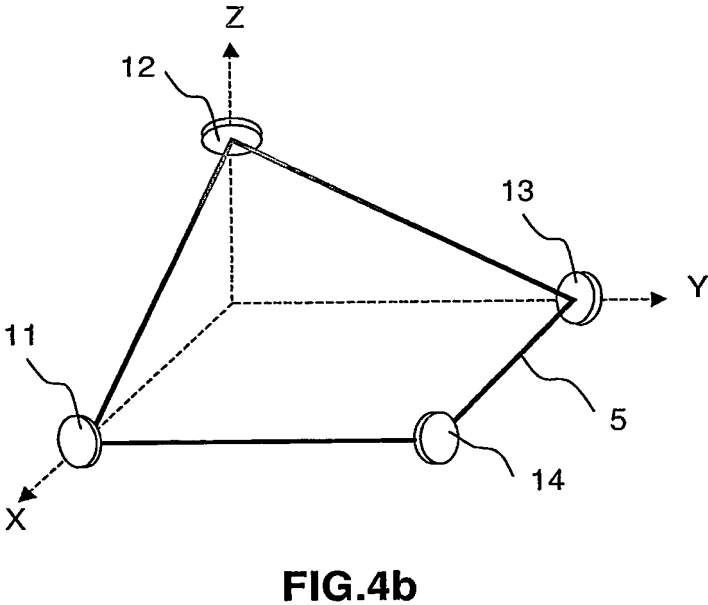
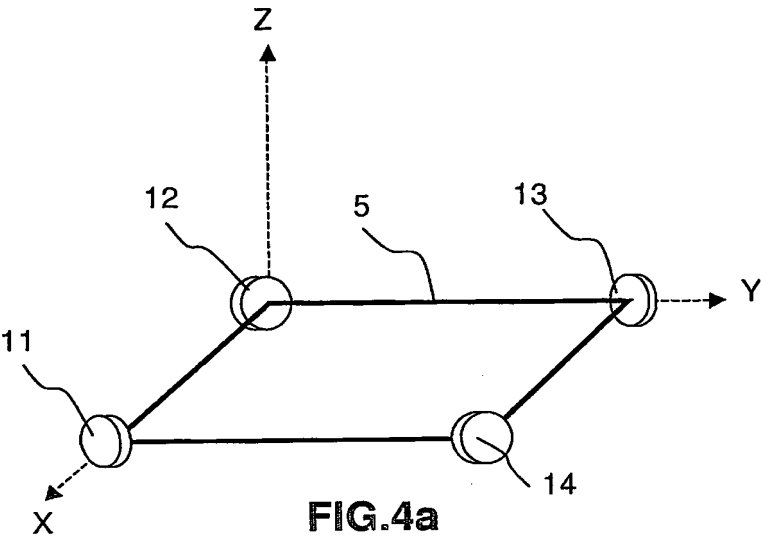


FIG.3



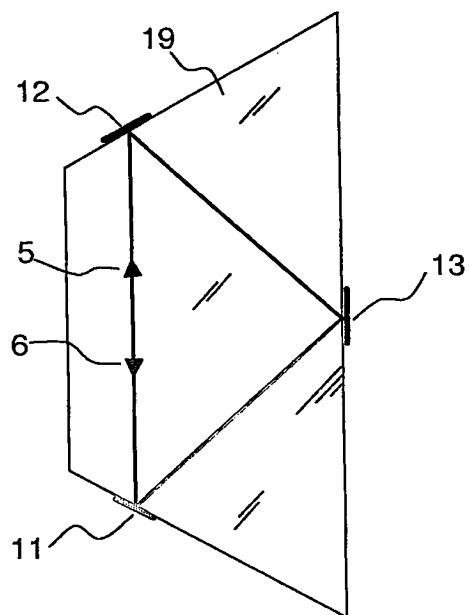


FIG.5

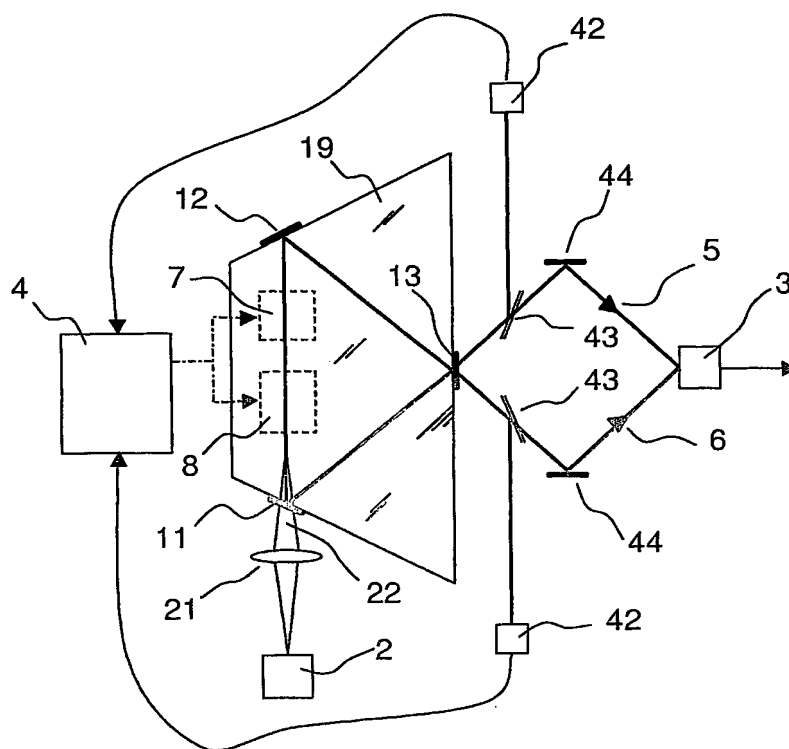


FIG.6

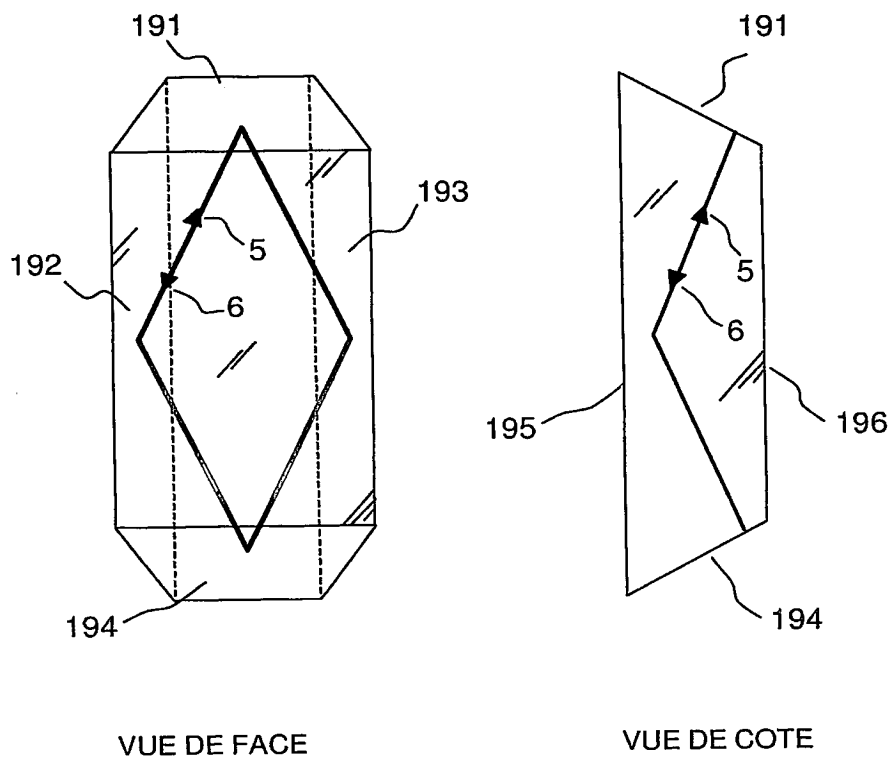


FIG.7

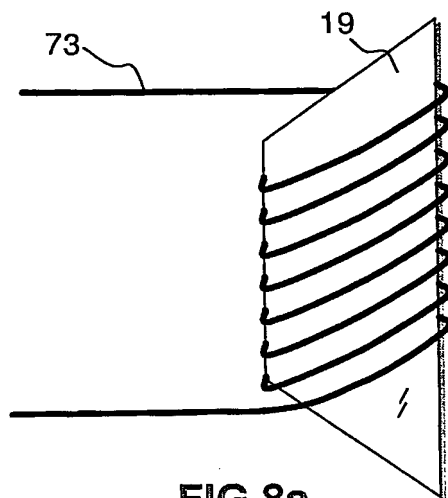


FIG. 8a

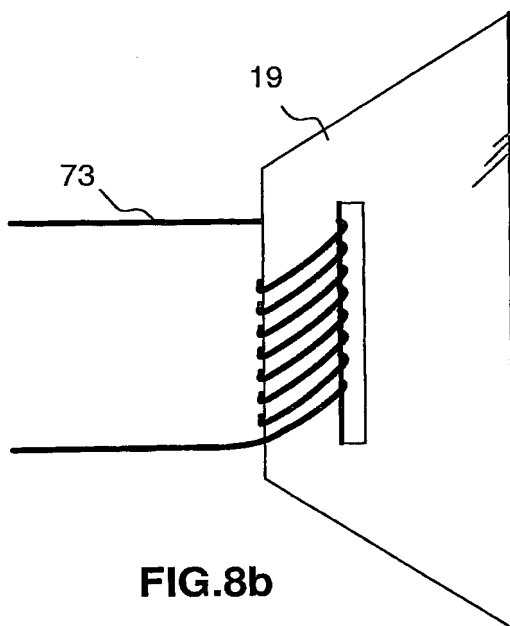


FIG. 8b

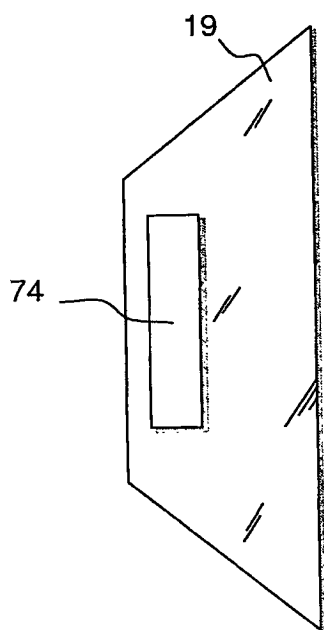


FIG.9

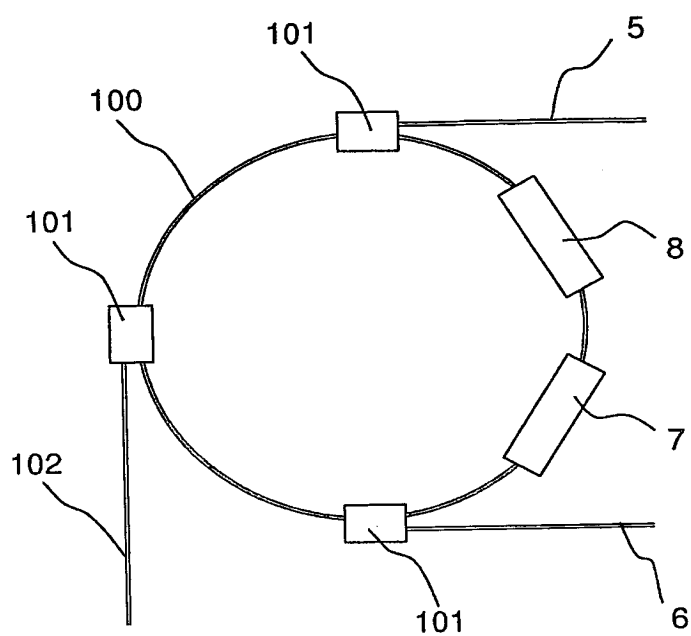


FIG.10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/EP2004/050349

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC 7 G01C19/66 H01S3/083

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
IPC 7 G01C H01S G01P

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the International search (name of data base and, where practical, search terms used)
EPO-Internal, WPI Data, PAJ

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 4 955 034 A (SCERBAK DAVID G) 4 September 1990 (1990-09-04)	1-9, 11-15
Y	column 1, line 5 - line 64 column 3, line 34 - column 4, line 61 column 7, line 58 - column 10, line 55; figures 1,10,11	10
X	WO 91/10273 A (UNIV LELAND STANFORD JUNIOR) 11 July 1991 (1991-07-11)	1-9, 11-15
Y	page 2, line 33 - page 4, line 14 page 6, line 24 - page 7, line 16 page 11, line 31 - page 19, line 15 page 26, line 6 - line 9; figures 1A,10A	10
Y	US 3 867 034 A (ARONOWITZ FREDERICK) 18 February 1975 (1975-02-18) column 2, line 29 - column 3, line 62; figures 1,2	10
	----- -/-	

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents:

- *A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- *E* earlier document but published on or after the international filing date
- *L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- *T* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- *X* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- *Y* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- *G* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

23 August 2004

Date of mailing of the international search report

13/09/2004

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Springer, O

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/EP2004/050349

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	US 3 649 931 A (MACEK WARREN M) 14 March 1972 (1972-03-14) column 1, line 46 - column 5, line 63; claim 1; figure 1 -----	10
A	US 5 347 360 A (HOLZ MICHAEL) 13 September 1994 (1994-09-13) column 2, line 22 - column 3, line 40; figure 1 -----	1-15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/EP2004/050349

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 4955034	A	04-09-1990	NONE	
WO 9110273	A	11-07-1991	WO 9110273 A1 US 5177764 A	11-07-1991 05-01-1993
US 3867034	A	18-02-1975	NONE	
US 3649931	A	14-03-1972	NONE	
US 5347360	A	13-09-1994	NONE	

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale No

PCT/EP2004/050349

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE
CIB 7 G01C19/66 H01S3/083

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)

CIB 7 G01C H01S G01P

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si réalisable, termes de recherche utilisés)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie *	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	US 4 955 034 A (SCERBAK DAVID G) 4 septembre 1990 (1990-09-04)	1-9, 11-15 10
Y	colonne 1, ligne 5 - ligne 64 colonne 3, ligne 34 - colonne 4, ligne 61 colonne 7, ligne 58 - colonne 10, ligne 55; figures 1,10,11	
X	WO 91/10273 A (UNIV LELAND STANFORD JUNIOR) 11 juillet 1991 (1991-07-11)	1-9, 11-15 10
Y	page 2, ligne 33 - page 4, ligne 14 page 6, ligne 24 - page 7, ligne 16 page 11, ligne 31 - page 19, ligne 15 page 26, ligne 6 - ligne 9; figures 1A,10A	
Y	US 3 867 034 A (ARONOWITZ FREDERICK) 18 février 1975 (1975-02-18) colonne 2, ligne 29 - colonne 3, ligne 62; figures 1,2	10
	----- -/-	

☒ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

* Catégories spéciales de documents cités:

- *A* document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent
- *E* document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date
- *L* document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)
- *O* document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens
- *P* document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

- *T* document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention
- *X* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément
- *Y* document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier
- *Z* document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

23 août 2004

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

13/09/2004

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale
Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

Springer, 0

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande Internationale No
PCT/EP2004/050349

C.(suite) DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie *	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
Y	US 3 649 931 A (MACEK WARREN M) 14 mars 1972 (1972-03-14) colonne 1, ligne 46 - colonne 5, ligne 63; revendication 1; figure 1 -----	10
A	US 5 347 360 A (HOLZ MICHAEL) 13 septembre 1994 (1994-09-13) colonne 2, ligne 22 - colonne 3, ligne 40; figure 1 -----	1-15

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale No

PCT/EP2004/050349

Document brevet cité au rapport de recherche		Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 4955034	A	04-09-1990	AUCUN	
WO 9110273	A	11-07-1991	WO 9110273 A1	11-07-1991
			US 5177764 A	05-01-1993
US 3867034	A	18-02-1975	AUCUN	
US 3649931	A	14-03-1972	AUCUN	
US 5347360	A	13-09-1994	AUCUN	